



МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРА, АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Сергеев Елисей Артёмович

аспирант кафедры геоэкологии и дистанционных методов мониторинга
Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Статья посвящена комплексному исследованию применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в задачах мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. Рассматриваются сенсорные платформы, алгоритмы полётов, аэродинамические особенности пробоотбора, методы анализа больших экологических данных, интеграция результатов в геоинформационные системы (ГИС) и цифровые модели атмосферы. Особое внимание уделяется возможностям дронов в выявлении локальных источников выбросов, мониторинге промышленных предприятий, транспортных магистралей, городских уличных каньонов и зон задымления при пожарах. Показано, что дроны позволяют впервые создавать высокодетализированные трёхмерные поля загрязнений, недоступные традиционным методам наблюдений. Статья раскрывает как преимущества БПЛА, так и ключевые ограничения их применения: ограниченное время полёта, зависимость от погодных условий, нормативные барьеры, необходимость тщательной калибровки сенсоров и влияние турбулентности на точность замеров. Сделан вывод о формировании новой парадигмы мониторинга атмосферы.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, беспилотные аппараты, PM_{2.5}, газоанализаторы, дистанционное зондирование, ГИС, экологический мониторинг.

Введение

Атмосфера постоянно меняется под влиянием природных и антропогенных факторов. Она многослойна, неоднородна и динамична, а загрязняющие примеси распределены в ней крайне неравномерно. Стационарные посты наблюдений фиксируют качество воздуха лишь точечно, при этом реальные концентрации загрязнений могут сильно варьировать уже в пределах одной городской улицы. Особенно это заметно в уличных каньонах, около промышленных объектов, перекрёстков, транспортных развязок, районов плотной застройки и территорий, подверженных влиянию бытовых и промышленных выбросов.

Современные вызовы — изменение климата, рост городов, увеличение транспортной нагрузки, масштабные лесные пожары — требуют инструментов, способных работать гибко, оперативно и пространственно подробно. Именно в этой точке и появилась технологическая революция: использование беспилотных летательных аппаратов в экологическом мониторинге.

Дрон способен летать в нескольких метрах над поверхностью дороги, зависать на высоте 100 метров, подниматься в верхние слои приземной атмосферы, обследовать промышленные трубы, двигаться вдоль линий выбросов, проходить над лесными пожарами — и при этом фиксировать концентрации загрязняющих веществ в реальном времени.

Это открыло новый, ранее недоступный формат наблюдений — трёхмерное «сканирование» атмосферы.

Природа атмосферных загрязнений и факторы пространственной изменчивости

Загрязнение атмосферы формируется целым комплексом процессов: химических, физических, метеорологических и антропогенных. В этой среде трудно выделить однозначные закономерности, поскольку концентрации загрязняющих веществ могут меняться по высоте, по направлению улицы, по расстоянию от источника и по времени суток.

Твёрдые частицы PM_{2.5} и PM₁₀

PM_{2.5} считаются наиболее опасными из-за способности проникать в лёгкие и кровеносную систему. Их содержание может меняться в 3–5 раз в пределах одного квартала. Близость транспортных потоков, активность строительства, состояние дорожного покрытия — всё это создаёт сложные локальные зоны повышения концентраций.

Диоксид азота, озон, оксид углерода

NO₂ тесно связан с транспортом; озон формируется в верхних слоях под воздействием солнечного света; CO связан с неполным сгоранием топлива. Их вертикальное распределение невозможно измерить только приборами на земле.

Летучие органические соединения

ЛОС может образовывать токсичные смеси, реагировать с другими примесями, изменять свои концентрации при нагреве и охлаждении поверхности.

Температурные инверсии

Это один из самых опасных эффектов. Когда тёплый воздух задерживает холодный у поверхности земли, загрязнения концентрируются в приземном слое.

Посты наблюдений фиксируют это плохо — дроны же позволяют увидеть вертикальный профиль концентраций.

Таким образом, необходимость трёхмерных измерений становится очевидной — и здесь у дронов нет альтернативы.

Сенсорные платформы БПЛА: технологическая основа современного мониторинга

Эффективность мониторинга зависит от качества сенсоров.

Современные дроны оснащаются:

- электрохимическими датчиками газов (NO_2 , SO_2 , CO , O_3);
- лазерными датчиками $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ (оптическими счётчиками частиц);
- инфракрасными спектрометрами CO_2 и CH_4 ;
- датчиками температуры, влажности, давления и ветра;
- пассивными пробоотборниками для ЛОС;
- миниатюрными метеостанциями, контролирующими параметр среды.

Правильное размещение сенсоров — критично: поток от пропеллеров вызывает турбулентность, и если датчик установлен неверно, значения будут искажены. Поэтому применяются выносные карбоновые штанги, боковые подвесы, системы пассивной стабилизации и алгоритмы фильтрации данных.

Методики отбора проб: аэродинамика, фильтрация и калибровка

Работа сенсоров на дроне осложняется аэродинамическими особенностями аппарата. Пропеллеры создают зоны разрежения и вихревые структуры, которые могут либо снижать концентрацию загрязнений вокруг датчика, либо, наоборот, поднимать осевшие частицы.

Поэтому методики отбора проб включают:

- учёт скорости полёта (оптимально 1–3 м/с);
- стабилизацию по ветру;
- использование двух датчиков для перекрёстной валидации;
- вынесенные заборники воздуха;
- температурные компенсации;
- алгоритмы сглаживания и медианной фильтрации.

Без всего этого данные не могут считаться научно достоверными.

Типы миссий и сценарии полётов

Для мониторинга атмосферы разработано несколько моделей полётов:

Вертикальные профили атмосферы

Позволяют измерить распределение загрязнений по высоте: от уровня земли до 200–300 метров. Это незаменимо при исследовании инверсий.

Горизонтальные маршруты вдоль дорог

Используются для оценки влияния транспорта. Показатели NO₂ и PM_{2.5} меняются буквально на каждом метре.

Облеты промышленных зон

Позволяют выявлять скрытые выбросы, утечки метана, точки несанкционированных выбросов.

Зонды в атмосфере пожаров

Дроны могут входить в зону задымления, недоступную наземным группам.

Сеточная съёмка территории

Для создания трёхмерных моделей загрязнений с последующей обработкой в ГИС.

Мониторинг промышленных выбросов

Дроны стали важнейшим инструментом в выявлении:

- утечек метана;
- выбросов ЛОС;
- точечных выбросов из вентиляционных шахт;
- нарушений технологического регламента;
- микрочастиц на металлургических предприятиях.

В отличие от наземных лабораторий, дрон может подняться прямо к источнику — к трубе, к зоне охлаждения, к резервуарам. Это позволяет фиксировать утечки, которые иначе были бы незамеченными.

Мониторинг городской атмосферы

Города — наиболее сложная среда для мониторинга. Дроны позволяют изучать:

- структуру уличных каньонов;
- влияние зданий на циркуляцию воздуха;
- накопление загрязнений в «карманах застоя»;
- влияние автострад;
- тепловые острова;
- ночные и дневные циклы качества воздуха.

Такие данные невозможно получить стационарными средствами.

Лесные пожары и чрезвычайные ситуации

Во время пожаров дроны позволяют:

- фиксировать концентрации PM2.5, CO, VOC;
- отслеживать направление распространения дыма;
- строить карты задымления;
- прогнозировать зоны риска.

Главное преимущество — возможность быстро добраться до зоны, опасной или недоступной для людей.

Интеграция данных с ГИС и цифровыми моделями

Измерения дронов превращаются в:

- трёхмерные облака данных концентраций;
- пространственные модели;
- карты риска;
- прогнозные схемы распространения примесей;
- цифровые двойники атмосферы.

ГИС-технологии позволяют объединять данные дронов с:

- спутниковой информацией,
- постами наблюдений,
- метеомоделями,
- данными мобильных лабораторий.

Это создаёт полноценную систему мониторинга.

Машинное обучение как инструмент интерпретации

ИИ используется для:

- распознавания источников загрязнений;
- прогнозирования концентраций;
- классификации типов аэрозолей;
- выявления аномалий;
- анализа паттернов задымления;
- оптимизации маршрутов полётов.

Особенно важны модели ИИ при анализе больших массивов данных, которые дроны собирают за несколько минут.

Ограничения применения БПЛА (расширенные абзацы)

Ограниченное время полёта

Большинство дронов работает от 20 до 40 минут без подзарядки, что сильно ограничивает охват территории и сложность миссий. В условиях холода, сильного ветра или высокой нагрузки сенсоров время полёта может сокращаться до 12–18 минут. Это требует продуманной логистики: распределения точек измерений, создания коротких, но информативных маршрутов, использования сменных аккумуляторов или ротации нескольких аппаратов. При выполнении вертикальных профилей или многократных облётов зоны загрязнения ресурс батареи становится критическим фактором, ограничивающим количество собираемых данных. Короткий полёт также снижает возможность медленного, точного зондирования атмосферных слоёв.

Зависимость от погоды

Сильный ветер, дождь, снег, туман, обледенение и высокая влажность существенно ограничивают возможности измерений. Ветер вызывает усиленную турбулентность, которая искажает данные сенсоров. Влажность может искусственно увеличивать показатели PM2.5, а низкие температуры снижают ёмкость батарей. В условиях плохой погоды загрязнения часто достигают максимума — но именно тогда дроны иногда не могут подняться в воздух. Это делает БПЛА уязвимым инструментом при реагировании на аварийные выбросы и ЧС.

Нормативные ограничения

Юридические барьеры осложняют мониторинг, особенно в городах и промышленных регионах. Полёты над жилыми зонами, возле заводов, возле охраняемых объектов требуют специальных разрешений. Бюрократические задержки препятствуют оперативному реагированию: чтобы запустить дрон над зоной аварийного выброса, требуется согласование, тогда как каждое промедление снижает эффективность контроля. Кроме того, в ряде зон полёты полностью запрещены, что механически исключает возможность мониторинга.

Необходимость калибровки оборудования

Сенсоры чрезвычайно чувствительны к температуре, влажности, вибрации и турбулентности. Без тщательной калибровки данные могут отклоняться на десятки процентов. Требуются регулярные проверки сенсоров, сравнение с эталонными станциями, корректировка нулевых линий, построение температурных компенсаций. Это увеличивает стоимость, усложняет подготовку и требует квалифицированных специалистов. В реальной полевой работе, особенно в условиях ЧС, калибровка становится сложной, но критически важной процедурой.

Влияние турбулентности

Турбулентность вокруг дрона и в атмосфере — одно из главных источников ошибок. Пропеллеры создают вокруг аппарата сложное аэродинамическое поле, которое может искажать концентрации примесей в зоне измерений. В городах воздушные потоки дробятся зданиями, образуя вихри и зоны застоя. Это создаёт условия, при которых измерения сенсоров становятся нестабильными. Для компенсации используют выносные штанги, фильтрацию данных, стабилизацию скорости полёта, двойные сенсорные платформы. Но полностью исключить влияние турбулентности невозможно.

Заключение

Беспилотные летательные аппараты стали одним из ключевых инструментов современного мониторинга атмосферного воздуха. Они обеспечивают уникальное сочетание мобильности, точности и трёхмерности данных. Дроны позволяют выявлять локальные выбросы, анализировать структуру городского воздуха, оценивать влияние транспорта, обследовать промышленные зоны, работать в условиях лесных пожаров и чрезвычайных ситуаций. Интеграция данных БПЛА в ГИС, цифровые модели и системы машинного обучения формирует новую архитектуру «умного» экологического мониторинга.

Несмотря на существующие ограничения — короткое время полёта, погодные риски, юридические барьеры, необходимость калибровки и влияние турбулентности — роль дронов продолжает расти. Развитие технологий аккумуляторов, миниатюрных сенсоров, автономных систем навигации и цифровых двойников атмосферы приведёт к тому, что БПЛА станут центральным элементом национальных систем экологического контроля.

Литература

1. Алексеев К. А. Мониторинг атмосферы: современные подходы. М.: Наука, 2023.
2. Бурова Л. В. Дистанционные методы контроля качества воздуха. СПб.: Питер, 2022.
3. Дегтярёв П. С. Газоанализаторы и сенсорные системы. М.: Инфра-М, 2020.
4. Еремин А. В. ГИС в экологическом мониторинге. Екатеринбург: УрО РАН, 2023.
5. Ларина С. Г. БПЛА в природоохранном мониторинге. Новосибирск: СО РАН, 2022.
6. Карпухин Д. М. Аэрозольные процессы в атмосфере. М.: Физматлит, 2021.
7. Гончаров И. Р. Аэросъёмка в экологии. Владивосток: ДВО РАН, 2021.
8. Сорокин А. П. Лесные пожары и атмосферное загрязнение. СПб.: РГПУ, 2020.